

DOI: 10.11779/CJGE201903012

# 基于静力触探试验的基坑开挖卸荷单桩水平承载力损失预测研究

童立元<sup>1, 2</sup>, 李洪江<sup>\*1, 2</sup>, 刘松玉<sup>1, 2</sup>, 杨涛<sup>1, 2</sup>

(1. 东南大学岩土工程研究所, 江苏南京 210096; 2. 东南大学江苏省城市地下工程与环境安全重点实验室, 江苏南京 210096)

**摘要:** 选取典型成层地基场地并设计试坑开挖卸荷试验, 开展了基于静力触探 (CPT) 测试的基坑开挖卸荷单桩水平承载力损失程度预测研究。通过在试坑开挖卸荷前后进行 CPT 原位测试, 得到了试坑开挖卸荷前后的 CPT 贯入锥尖参数变化规律。进而基于 CPT 测试  $p$ - $y$  模型研究了基坑开挖卸荷前后邻近既有单桩的水平承载力损失及桩身弯矩分布特征。分别考察了基坑开挖卸荷后邻近桩基试桩加载模式下的残余水平承载力和桩顶加载联合土体位移共同作用下的卸荷桩基水平承载特性。研究表明, 依据真实卸荷土体 CPT 参数更能准确预测桩基水平承载力损失程度及损失特征, 卸荷桩设计阶段须同时考虑卸荷桩较自由场地桩基的水平承载力损失及土体运动位移对桩基水平承载的影响。以上研究为合理确定基坑开挖引起的既有桩基水平承载力损失提供了一种技术思路, 同时对卸荷桩水平承载性能评价具有参考意义。

**关键词:** 静力触探; 桩基; 开挖卸荷; 水平承载力;  $p$ - $y$  曲线

**中图分类号:** TU473      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4548(2019)03-0501-08

**作者简介:** 童立元(1975-), 男, 副教授, 博士, 博士生导师, 主要从事桩基础与地下工程方面的教学与研究工作。  
E-mail: 101010519@seu.edu.cn

## Prediction of lateral capacity losses of a single pile adjacent to excavation of foundation pits based on CPT tests

TONG Li-yuan<sup>1, 2</sup>, LI Hong-jiang<sup>1, 2</sup>, LIU Song-yu<sup>1, 2</sup>, YANG Tao<sup>1, 2</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Urban Underground Engineering and Environmental Safety, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The prediction of lateral capacity losses of a single pile adjacent to the excavation of foundation pits is made, by designing the excavation of a test pit in multi-layer soils based on CPT tests. The CPT- $q_c$  curves before and after the excavation of the test pit are obtained and compared, and the lateral capacity losses of the single pile adjacent to the excavation of the test pit and its bending moment characteristics are analyzed using CPT-based  $p$ - $y$  curve models. The residual lateral capacity of the test pile after exaction unloading and the lateral bearing rules facing the combined loadings from horizontal forces on pile head and soil movement forces are evaluated. The results show that using the actual CPT parameters of unloading soils is more reasonable than that of free-ground soils for the prediction of lateral capacity losses of a single pile adjacent to the excavation of foundation pits. The lateral capacity reduction after adjacent excavation unloading and the influences of lateral soil movement on piles must be taken into account in the design of engineering pile foundations. The study about CPT tests on unloading soils gives a technical approach for estimating the lateral capacity losses of the single pile adjacent to the excavation of foundation pits and has referential meanings for the evaluation of excavation unloading piles.

**Key words:** cone penetration test; pile foundation; excavation unloading; lateral bearing capacity;  $p$ - $y$  curve

## 0 引言

以深基坑为典型代表的地下空间开挖已成为城市建设的新常态, 由此导致的环境土工问题成为地下空间开发面临的新挑战。调查显示<sup>[1-2]</sup>, 由于基坑开挖导致的工程桩基偏斜(甚至断裂)事故很多, 如上海莲

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0800201); 国家自然科学基金项目(51878157); 江苏省自然科学基金项目(BK20181282); 江苏省建设系统科技项目(2014ZD66); 中央高校基本科研业务费专项和江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(KYLX16\_0244)

收稿日期: 2018-01-15

\*通讯作者(E-mail: lihongjiang55@126.com)

花河畔景苑桩基断裂、广东海珠城广场基坑坍塌致邻近建筑桩基折断事故,马来西亚海洋软黏土中某基坑开挖触发软土塑性流动,造成70%工程桩出现开裂或折断。这些都源于对基坑开挖卸荷单桩水平承载预估不足而造成的。基坑开挖卸荷对邻近工程桩基的影响是一个复杂的桩土相互作用问题。针对这一科学问题,Roscoe等<sup>[3]</sup>、Yin等<sup>[4]</sup>、刘国彬等<sup>[5]</sup>研究了不同卸荷环境下的土体工程特性变化规律。Poulos等<sup>[6]</sup>、Goh等<sup>[7]</sup>、ONG等<sup>[8]</sup>,黄茂松等<sup>[9]</sup>则通过理论和试验手段研究了基坑开挖卸荷桩基承载变形响应规律。整体而言,以往的研究更多的关注于基坑开挖卸荷引起的地表沉降、支护桩水平及竖向承载变形规律,对既有工程桩水平承载力的损失预测研究关注较少,特别是对主被动复合加载条件下的工程桩水平承载能力评价尚缺乏深入研究。

既有工程桩往往先于基坑开挖打入土中,邻近基坑开挖后,无法再对桩基开展水平静力载荷试验。因此到目前为止,国内外尚没有一种有效考虑开挖卸载效应的既有桩基水平承载预测方法和试验方法。静力触探(CPT)是一种快速的岩土原位测试技术,与现场水平试桩或室内重塑模拟试验相比,CPT试验在获取土体应力历史、反应土层非均匀性、成层性及状态变化等方面具有优势。已经有研究指出<sup>[10]</sup>,CPT贯入参数与土体的水平向有效应力密切相关,可以准确反映桩基水平承载变形规律。Dyson等<sup>[11]</sup>、Haldar等<sup>[12]</sup>、Lee等<sup>[10]</sup>、Suryasentana等<sup>[13]</sup>、李洪江等<sup>[14]</sup>围绕CPT与水平受荷桩理论做了探索性工作,发展了基于CPT原位测试的桩基水平承载分析方法。李洪江等<sup>[14]</sup>证明了CPT受到的土体水平向有效应力与竖向有效应力的比为1.73:1,给出了CPT应用于桩基水平承载分析的理论解释。但调研发现,目前极少有学者关注CPT在预测基坑开挖既有桩基水平承载方面的研究,未见相关研究成果发表。

本文基于上述研究背景,开展了基于CPT测试的基坑开挖卸荷单桩水平承载力损失预测研究,提出了基于CPT测试卸荷桩基水平承载预测方法,得到了开挖卸荷土体锥尖参数变化及卸荷桩基水平承载力损失规律,对基坑开挖卸荷既有工程桩水平承载响应研究具有借鉴意义。

## 1 试验设计

对既有工程桩开挖卸荷研究的难点在于场地的预先选择和试验的预先设计,因为工程桩往往先于场地开挖进行施工,在场地大面积开挖之前就已埋入地层以下。本试验选定靖江市文化中心建设项目为试验场地,在该项目桩基工程和基坑开挖工程施工之前确立

试验方案。靖江文化中心项目总建筑面积143100 m<sup>2</sup>,地下建筑面积49000 m<sup>2</sup>。主体结构分高层部分(办公区、博物馆、文化办公楼)、公共文化区、商业区及剧院几大部分,整个场地设有一层大底盘地下室。其中,商业剧场区由支撑大跨桁架层的4个巨型核心筒组成,4个巨型核心筒下采用桩径1.0 m的钻孔灌注桩。该场地属江苏典型长江冲积地层,广泛分布有粉质黏土层,淤泥质粉质黏土层,土体开挖后极易发生侧向运动,具有研究代表性。

本次试验桩和试坑位置选定在场地大面积开挖后的第二个核心筒地块(箱型基础2)处,如图1(a)所示,试验桩P1和P2均为灌注桩,在场地开挖前就已埋入地层。其中P2桩桩身布设了振弦式钢筋应力计用于测试深部桩体受力变化。随后场地进行一层地下室整体开挖,开挖深度至地表以下6 m(以此为自然场地标高处)。场地大面积开挖后,进入到分块开挖支护阶段。在第二核心筒地块围护桩施工结束后进行试坑开挖试验,研究试坑开挖对邻近既有桩基的水平承载影响。图1(a)列出了核心筒位置试验桩、静力触探(CPT)孔和试坑的相对位置关系,试验区域共进行了4个孔的CPT试验,其中CPT-4在试坑开挖结束后进行,其它3组CPT试验均在试坑开挖前同步完成。试坑尺寸:长×宽×深=5 m×5 m×4 m,试坑外沿距离P2桩中心轴线1.5 m。本试验由于箱型基础2周围施工了30 m×16 m的围护墙体,可以认为围护墙外侧的土体不受试坑开挖卸荷的影响。围护墙体外侧为自由场地(不受试坑开挖影响),内侧为试坑开挖扰动影响区,因此可以确保P1桩和P2桩能真实反映试坑开挖造成的邻近桩基(P2)承载力损失与自由场地桩基(P1)初始承载力的比较。

图1(b)详细给出了自由场地、试坑开挖影响区内各试验设计要素的相对位置关系。为确保CPT测试参数能真实反映桩基承载参数,CPT-1和CPT-4测孔严格临近试验桩位置,距离桩侧壁0.5 m,CPT-2和CPT-3为辅助性试验孔。为考察试坑开挖引起的土体位移对桩基水平承载的影响,在与试验桩P2沿试坑开挖线同一平行位置处设了测斜管。试验桩P2钢筋应力计自场地自然标高(-5.75 m)开始,沿桩身15 m以内每隔1 m布置一对,15~30 m每2 m布置一对,共计23对,每对钢筋应力计连线垂直于开挖线(如图1(b))。试验桩P2顶部还布设了水准测量的反光镜(高于场地标高25 cm)用于观测开挖引起的桩顶极限变形。试坑采用长臂挖掘机进行规范化开挖,挖深4 m,根据Poulos等<sup>[6]</sup>安全系数法判定试坑挖深小于土体的有效自立高度。本次试坑开挖是整个项目工程开挖的一部分,因此不影响场地开挖施工顺序。

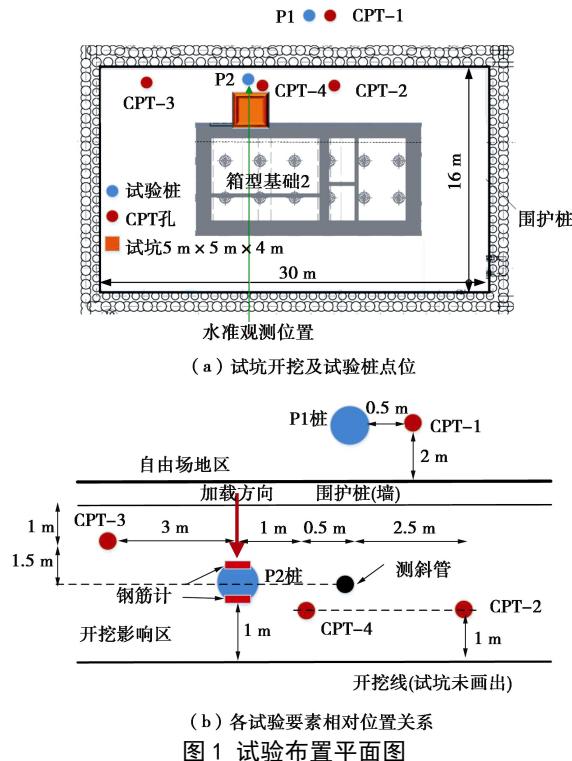


Fig. 1 Layout of test piles undergoing excavation unloading

## 2 静力触探测试

静力触探的优势在于可以提供连续的土层参数, 图2给出了CPT 4个测孔的锥尖阻力分布曲线及基于

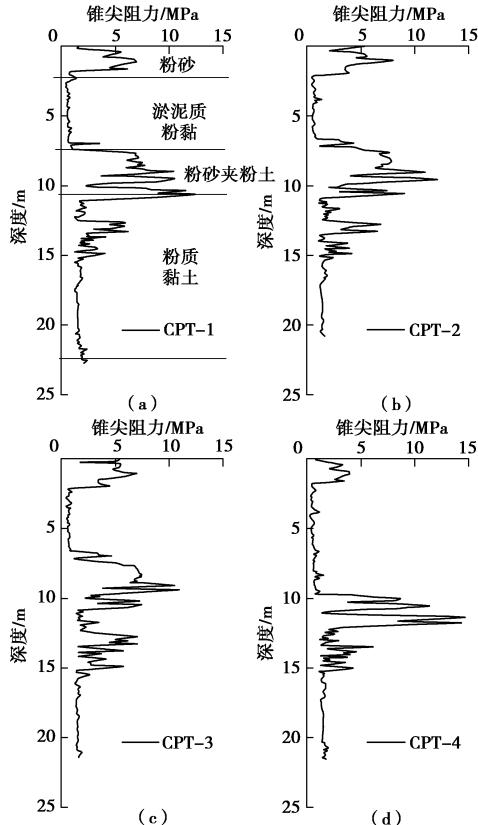


图2 CPT 锥尖阻力曲线与土体分层 (起始贯入标高均为场地自然标高-5.75 m 处)

Fig. 2 CPT- $q_c$  curves and soil layers at testing site

CPT-1 测孔的自由场地土层分层情况。钻孔前进行了场地平整, CPT 起始贯入标高均为场地自然标高-5.75 m 处。从图中可以看出, 试坑未开挖前, 围护墙内外侧土层分层情况较均匀, 场地土层分布变异性不大。CPT-2 和 CPT-3 测孔数据基本一致, 可以代表试坑开挖前试验桩 P2 的初始锥尖参数, 同时 CPT-2 和 CPT-3 与自由场地 CPT-1 测孔数据也基本一致, 这种均一性保证了试坑开挖前后数据对比的可靠性。CPT-4 是试坑开挖结束后, P2 桩周附近的锥尖测试曲线。

图3为试坑开挖前后土体CPT 锥尖阻力对比曲线, 试坑开挖后, 原始土层地应力发生扰动, 土体锥尖参数发生改变, 从图中可以看出, CPT 锥尖参数的改变与土体卸荷应力路径密切相关。本文将试坑开挖效应分为两类: ①侧向卸荷效应 (HU, horizontal unloading), 该效应主要集中在开挖面以上部位, 由于试坑开挖造成上部桩周土体侧向应力释放, 引起CPT 贯入锥尖阻力下降, 土体对桩基的侧向约束能力降低。受侧向卸荷影响, (0~2.5) m 粉砂层锥尖阻力发生明显降低, (2.5~4) m 淤泥质粉黏层降低不明显; ②竖向卸荷效应, (VU, vertical unloading), 试坑挖深 4 m 对其下一定深度的土体产生竖向应力释放, 致使土体的锥尖阻力下降。从图中看出, 土层深度超过 10 m 后, 试坑开挖几乎不再产生影响, CPT 锥尖测试曲线保持不变。需要指出的是, 对于竖向卸荷效应 (VU), 淤泥质粉质黏土和粉砂所受到的影响不同, 依据土体莫尔库仑抗剪强度公式:

$$\tau = \sigma \tan \varphi + c \quad (1)$$

式中,  $\tau$  为土体抗剪强度,  $\sigma$  为竖向应力,  $c$  为土体黏聚力,  $\varphi$  为内摩擦角。

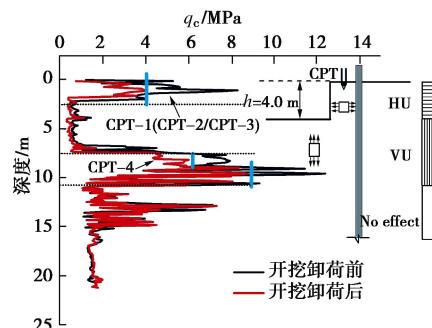


图3 试坑开挖前后土体锥尖阻力对比曲线

Fig. 3 Comparison of CPT curves before and after excavation

淤泥质粉质黏土自身强度很低, 其抗剪强度主要受控于黏聚力  $c$ , 受土体竖向应力的影响弱, 卸荷后强度基本不变。粉砂层受到试坑开挖竖向卸荷后,  $\sigma$  明显降低, 其抗剪强度将会大幅降低。加之, 锥尖阻力服从  $q_c = f(\tau)$ <sup>[14]</sup>, 与土体抗剪强度正相关, 因此图7中试坑开挖结束后, (7.5~11) m 粉砂层测试锥尖阻

力明显降低, (2.5~7.5) m 淤泥质粉质黏土层锥尖阻力降低不明显。

由于测试场地土层分层变异性不大, CPT-1、CPT-2 与 CPT-3 测试曲线基本一致, 图 3 在反映自由场地与卸荷场地锥尖参数差异性关系的同时 (CPT-1 与 CPT-4 比较), 也反映了试坑开挖前后桩侧真实土体应力状态的改变 (CPT-4 与 CPT-2/CPT-3 比较)。当 CPT 测试参数直接用于桩基水平承载分析时, 桩周土连续的土层参数及土体的非均匀性、成层性、卸荷变异性就可以依据 CPT 贯入测试被充分的考虑进来, 有益于更准确地获得试坑开挖前后的桩基水平承载差异性变化及卸荷后的桩基水平承载力损失情况。

### 3 开挖卸荷桩基水平承载力损失预测

#### 3.1 基于 CPT 测试 $p-y$ 模型

试坑开挖后, 桩侧土体的应力状态发生改变, 桩基水平承载力较自由场地桩基会发生变异。另外, 实际工程中, 建筑既有工程桩往往已经承受一定的桩顶水平力, 如果同时遭受基坑开挖引起的土体侧向位移作用, 其承载状况将变得更加复杂。以往对卸荷桩基的计算, 多直接采用自由场地的  $p-y$  计算参数, 这会带来计算误差。本研究采用西澳大学开发的 PYGMY 程序<sup>[15]</sup> 基础上, 通过引入基于实测数据的 CPT 测试  $p-y$  曲线, 联合现场试桩试验, 对卸荷桩基水平承载性能进行预测。PYGMY 基于有限元思想, 桩体被离散成一定数量的理想弹塑性梁单元, 桩-土接触采用非线性土弹簧 ( $p-y$  曲线), 该程序可以导入自行定义的  $p-y$  曲线。由此重点考察以下两个方面: 试坑开挖卸荷后邻近桩基 P2 的残余水平承载力, 及其较自由场地桩基 P1 的水平承载力损失程度比较; 既有桩顶水平力加载下同时遭受基坑卸荷引起的土体位移作用, 这类主被动复合加载条件下桩基水平承载力损失特征。

采用李洪江等<sup>[14]</sup>、Suryasentana 等<sup>[13]</sup>提出的分别针对软黏土和砂性土的 CPT 测试  $p-y$  法, 将图 3 测定锥尖参数直接用于确定  $p-y$  曲线。这样确定的  $p-y$  能真实反映试坑开挖前后桩侧土体的真实应力状态改变。

李洪江等<sup>[14]</sup>建议的软黏土 CPT 测试  $p-y$  方程为

$$p = \frac{0.5N_c}{N_k} D(q_c - \gamma z) \left[ \frac{100y}{(0.215q_c/p_a - 1.25)D} \right]^{1/3}, \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} N_c &= 3 + \frac{N_k \gamma' z}{q_c - \gamma z} + \frac{0.5z}{D} \quad (z < z_r), \\ N_c &= 9 \quad (z \geq z_r), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

$$z_r = \frac{6D}{\gamma' \frac{N_k D}{q_c - \gamma z} + 0.5}, \quad (4)$$

式中,  $p$  为桩侧土抗力 (kN/m),  $y$  为桩挠曲变形 (m),  $\gamma$  为土重度 (kN/m<sup>3</sup>),  $\gamma'$  为有效重度 (kN/m<sup>3</sup>),  $z$  为土层深度 (m),  $D$  为桩直径 (m),  $q_c$  为锥尖阻力 (MPa),  $p_a$  为标准大气压力值 ( $p_a=0.1$  MPa),  $N_k$  为锥尖系数,  $N_c$  为桩侧土极限承载力系数, 取值方法见文献[14]。

Suryasentana 等<sup>[13]</sup>建议的砂性土 CPT 测试  $p-y$  方程为

$$p = p_u \left\{ 1 - \exp \left[ -6.2 \left( \frac{z}{D} \right)^{-1.2} \left( \frac{y}{D} \right)^{0.89} \right] \right\}, \quad (5)$$

$$p_u = 2.4 \gamma' z D \left( \frac{q_c}{\gamma' z} \right)^{0.67} \left( \frac{z}{D} \right)^{0.75}, \quad (6)$$

式中,  $p_u$  为桩侧极限土抗力 (kN/m), 其它参数意义同前。

本试验 CPT 测试深度 22 m (22 倍桩径), 式(2)、(5)  $p-y$  曲线模型所需锥尖阻力  $q_c$  直接从 CPT 测试曲线 (图 3) 中进行提取。在确定不同土层深度  $p-y$  曲线时, 需按实际土层分层, 计算以下每层土的平均有效锥尖阻力  $q_c(i)$ :

$$q_c(i) = \frac{1}{h_i} \int_0^{h_i} q_c(z) dz = \frac{1}{h_i} \sum_{j=1}^{j=N} q_c(j) \Delta z(j), \quad (7)$$

式中,  $h_i$  为第  $i$  层土厚度 (m),  $\Delta z(j)$ ,  $q_c(j)$  分别为第  $i$  层土离散后第  $j$  薄层单元厚度 (m) 和探头锥尖阻力 (MPa)。

将 CPT 获取的不同深度  $p-y$  曲线方程编入 PYGMY 程序进行桩基水平承载数值计算, 试验桩为钻孔灌注桩, 桩身计算参数见表 1。淤泥质粉质黏土, 粉质黏土采用公式 (2) 的 CPT 测试  $p-y$  方程, 粉砂, 粉砂夹粉土采用公式 (5) 的 CPT 测试  $p-y$  方程。

表 1 测试桩计算参数

Table 1 Parameters of test pile

有效桩长 $L$	直径 $D$	抗弯刚度 $EI$	钢筋	配筋率 $\rho$
30 m	1000 mm	$0.16 \times 10^7$ kN·m <sup>2</sup>	16φ25	0.95%
钢筋弹模 $E_g$	混凝土	保护层厚	混凝土弹模 $E$	
$2.0 \times 10^8$ kN/m <sup>2</sup>	C30	50 mm	$3 \times 10^7$ kN/m <sup>2</sup>	

#### 3.2 桩顶加载考察卸荷桩残余水平承载力

为明确试坑开挖卸荷后, 邻近既有工程桩残余水平承载力及其较自由场地桩基水平承载力损失情况, 首先采用上述 CPT 测试  $p-y$  模型开展了卸荷桩 P2 和自由场地桩 P1 的桩顶加载模拟。为验证计算结果的准确性, 同时进行了桩基水平静力载荷试验, 加载方向指向基坑, 试验过程严格按照《JGJ106—2014 建筑基桩检测技术规范》<sup>[16]</sup> 执行。试验加载分级 30 kN,

因为是工程桩还要满足建设需要, 此次加载极限位移按敏感建筑要求控制在 6 mm (《JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范》<sup>[17]</sup>)。

图 4 为获得的试坑开挖后 P2 桩与自由场地 P1 桩的桩顶加载 ( $H_0$ ) - 位移 ( $y_0$ ) 曲线计算结果与现场试验结果比对情况。可以看出, 较自由场地, 试坑开挖造成邻近桩基桩侧土体应力释放, 桩基 P2 水平承载性能下降, 其加载位移曲线刚度较自由场地明显减小, 按照《建筑桩基技术规范》<sup>[17]</sup>规定的 6 mm 确定临界水平承载力, 桩 P2 较 P1 临界水平承载力下降了 11.5%。本试验试坑开挖卸荷后, 邻近桩基 P2 残余水平承载力为 261 kN, 自由场地 P1 桩临界水平承载力为 285 kN。同时 P1, P2 桩的计算加载位移曲线与现场试桩结果吻合较好, 验证了基于实测 CPT 数据计算桩基残余水平承载力的准确性。需要指出的是, 由于 P2 桩开挖前的 CPT 测试曲线 (CPT-2/CPT-3) 与自由场地 CPT-1 基本一致, 图 4 所得结果也反映了桩 P2 在试坑开挖前及开挖后的水平承载力损失情况。在实际工程设计过程中, 如果盲目选用未开挖时的土体参数作为卸荷桩设计参数, 则会过高估计桩基水平承载力, 埋下安全隐患。因此, 对开挖卸荷既有建筑桩基承载性能的评估, 有必要采用静力触探试验获取卸荷后的实际土体应力参数, 进而作出准确的预测。

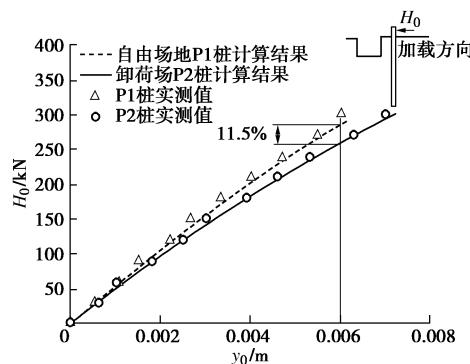


图 4 开挖卸荷桩 P2 和自由场地桩 P1 加载位移曲线

Fig. 4 Lateral load-displacement curves of P1 and P2

桩基施工阶段在 P2 桩内部埋设了钢筋应力计, 据此可以获得每级桩顶加载下的 P2 桩实测桩身弯矩。钢筋应力计实测桩身弯矩依据李洪江等<sup>[18]</sup>基于钢筋、混凝土变形协调的计算公式:

$$M(z) = \frac{EI[\sigma_l(z) + \sigma_y(z)]}{E_g d} \quad , \quad (8)$$

式中,  $M$  为桩身截面弯矩 ( $\text{kN}\cdot\text{m}$ ),  $\sigma_l$  为受拉侧钢筋计应力值,  $\sigma_y$  为受压侧应力值,  $d$  为受拉和受压侧钢筋计间距 ( $\text{m}$ ),  $I$  为将钢筋等效为同体积混凝土后的桩体复合惯性矩 ( $\text{m}^4$ ),  $E$  为桩身混凝土弹性模量 ( $\text{N/mm}^2$ ),  $E_g$  为钢筋弹性模量 ( $\text{N/mm}^2$ )。

图 5 为桩顶加载 150 kN 和 270 kN 下的卸荷桩 P2 实测弯矩及 PYGMY 程序计算所得弯矩的对比情况

(弯矩以背离开挖侧为正)。PYGMY 程序分别采用了卸荷场地 CPT-4 锥尖参数与自由场地 CPT-1 参数进行计算。从图中明显看出, 采用实际卸荷场地 CPT-4 锥尖参数更能准确获得深部桩体受力规律, 其预测结果与实测弯矩数据吻合较好, 而采用自由场地参数则会带来预测误差。相较自由场地 (不受开挖卸荷影响) 下的桩基受力, 试坑开挖卸荷后, P2 桩所受截面最大弯矩有所增大, 卸荷后的桩身弯矩更易接近极限开裂弯矩。另外, 图 5 中两级荷载下的截面最大弯矩增加率基本相同, 150 kN 下增加了 6.2%, 270 kN 下增加了 6.9%。这与桩顶加载位移控制在 6 mm 的约束条件相关, 6 mm 的加载位移使桩体和桩侧土体基本处于塑性变形阶段, 因此截面最大弯矩增加不会很明显。

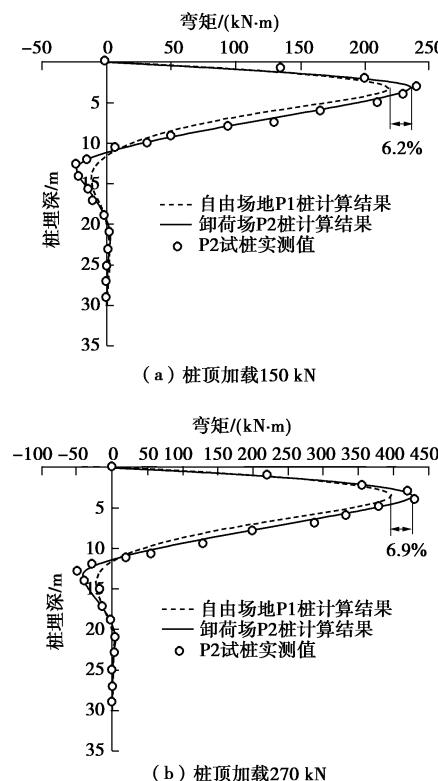


图 5 两级荷载下的 P2 桩和 P1 桩桩身弯矩对比

Fig. 5 Comparison of bending moment curves of P1 and P2 under two pile head loadings

### 3.3 桩顶加载联合土体位移作用模拟

既有桩基在服役期间往往桩顶已经承担了一定的水平载荷, 当面临邻近基坑开挖卸荷时, 桩基将进入桩顶加载联合土体位移加载的主被动加载工况, 这种主被动加载模式使得工程桩水平承载问题变得更加复杂。前述分析是基于卸荷后土体参数模拟桩顶加载推求卸荷桩基残余水平承载力, 本节将同时考察桩顶加载联合土体位移作用下的桩基水平承载特性, 其中桩

顶加载方向与土体位移作用同向, 均指向坑内。试验设计阶段, 在与桩体同一水平线上埋设了测斜管(图 1(b))用于量测试坑开挖引起的土体运动位移。PYGMY 程序<sup>[15]</sup>的被动桩计算原理是两阶段分析方法, 第一阶段确定土体自由场位移, 第二阶段将土体位移施加到桩体上, 通过 Winkler 地基梁法计算桩基响应。本文直接采用现场实测的土体水平位移, 同时把基于 CPT-4 锥尖参数的  $p-y$  方程录入 PYGMY 程序开展计算, 桩顶水平荷载则仍按每级 30 kN 进行施加。

图 6 为计算所得每级荷载下的桩身水平位移及土体运动实测位移,  $H_0=0$  条件对应的是只在土体运动位移下(仅被动受荷)桩体发生的水平位移。土体最大运动位移发生在地面标高下 5 m 附近, 位于淤泥质粉质黏土层。仅在土体位移作用下, 桩顶最大偏位 30.7 mm, 布设在桩顶的水准点观测到的位移是 30 mm, 二者吻合较好。在桩顶加载和土体位移共同作用下, 随着桩顶水平力  $H_0$  的增加, 桩身位移有所增加, 当  $H_0=270$  kN 时, 桩顶位移为 82 mm, 较  $H_0=30$  kN 桩顶位移 31.6 mm 增加了 50.4 mm。而图 4 试坑开挖卸荷后仅桩顶加载, P2 桩两级加载下的位移增量为 57.6 mm。这表明, 桩顶加载联合土体位移共同作用, 与不考虑土体位移作用相比, 同一桩顶水平力下前者桩身位移相对减小, 表现出桩身刚度增强效应。图 7 为  $H_0=150$  kN 加载下的桩身弯矩分布曲线, 该曲线包含了自由场地仅桩顶加载(图 5(a))、卸荷场地仅桩顶加载(图 5(a))、卸荷场地桩顶加载联合土体位移作用下的模拟结果对比。与仅在桩顶加载下的弯矩分布特征不同, 桩顶加载联合土体位移作用下的桩身弯矩发生明显的改变。土体运动位移使桩身内部产生了较大的负弯矩, 主要集中在上部 10D 范围以内, 负弯矩的存在使得桩基在承受桩顶主动加载时, 需要去克服桩身已经存在的负弯矩(表现出刚度增强效应), 这也是桩身抵抗变形能力增加进而桩顶水平变位降低的原因。

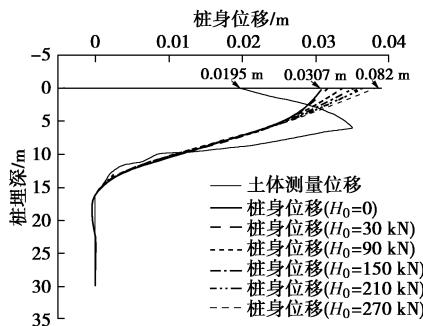


图 6 桩身位移和土体运动位移曲线

Fig. 6 Lateral movement curves of pile and soils

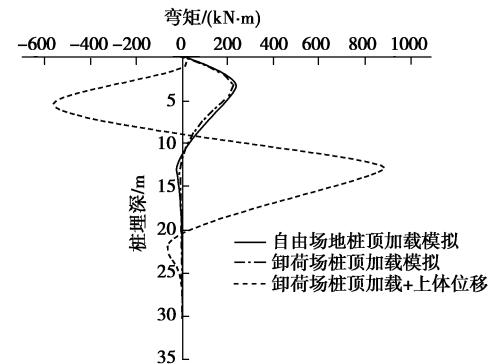


图 7 桩顶加载  $H_0=150$  kN 下 3 类情况弯矩曲线对比

Fig. 7 Three bending moment curves under  $H_0=150$  kN

图 8 是各级水平荷载下的桩身弯矩变化曲线, 可以看出, 在桩顶加载联合土体位移下, 随着桩顶水平荷载的增加, 桩身截面最大负弯矩不断减小, 负弯矩发生位置也呈现下降的趋势。同时, 桩身上部开始产生逐渐变大的截面正弯矩, 且正弯矩发生位置不断下移, 桩顶荷载传递深度不断加深。整个弯矩分布曲线, 在 15 m 附近的截面最大正弯矩变化并不明显。

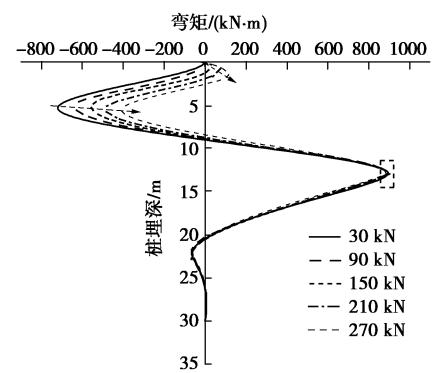


图 8 土体位移作用下各级桩顶水平荷载桩身弯矩变化

Fig. 8 Changing curves of bending moment under lateral soil movement and different loadings on pile head

对水平受荷桩的研究, 截面最大弯矩和桩顶水平位移是考察桩基水平承载性能的两个最重要指标, 为比较自由场地仅桩顶加载、卸荷场地仅桩顶加载、卸荷场地桩顶加载联合土体位移作用 3 类情况下的桩身承载性能, 图 9 绘制了截面最大弯矩与位移( $M_{max} - Y_0$ )关系曲线。试坑开挖卸荷前后桩顶加载条件下, 两者截面最大弯矩随位移的变化趋势基本一致。考虑土体和桩顶加载共同作用时, 截面最大弯矩主要由土体运动位移产生。如图 9, 在土体移动致桩顶偏移线以后, 随桩顶位移的增加, 截面最大正弯矩呈略微减小的趋势, 与图 8 作用规律一致。截面最大弯矩 - 位移曲线可以作为既有工程桩对邻近基坑开挖卸荷响应的特征曲线, 在本文限定位移 6 mm 以内, 试坑开挖结束仅桩顶加载时, 桩身截面最大弯矩随桩顶位移基本呈线性增加的趋势。当桩顶加载联合土体位移作用

时, 则要重点考察土体位移引起的截面最大弯矩, 同时在桩顶加载附加小变形下 (桩顶加载位移不超 6 mm) 则可以忽略桩顶加载引起的桩身弯矩变化值, 简化设计过程。

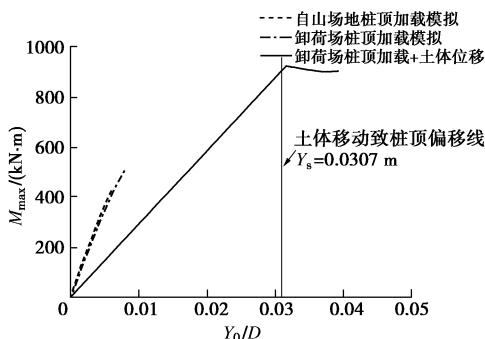


图 9 截面最大弯矩随桩顶位移的变化关系

Fig. 9 Maximum bending moment-displacement relations

综上而言, 在邻近基坑开挖卸荷过程中, 宜同时重视开挖卸荷结束及开挖卸荷过程, 桩顶遭受不同幅值水平加载时的桩基水平承载特性改变。基坑开挖卸荷结束及结束后的一段时间 (情形 1), 卸荷场桩顶受荷产生的桩身弯矩较自由场地桩基是增加的, 卸荷后的桩体更易达到极限开裂弯矩。同时, 工程桩在面临既有桩顶加载及土体位移共同作用时 (情形 2), 应该重视卸荷引起土体位移给工程桩造成的附加弯矩, 设计阶段应该充分兼顾这两个情形 1 和 2, 并给出承载力设计富余。基于此, 准确把握既有工程桩开挖卸荷响应规律, 有益于合理规避或减少因邻近地层开挖带来的工程桩失效及其上部建 (构) 筑物破坏事故。

## 4 结论与建议

本文通过设计试坑开挖卸荷试验, 基于 CPT 测试开展了基坑开挖卸荷对邻近既有桩基水平承载影响分析研究, 得到以下主要结论:

(1) 结合提出的 CPT 测试  $p - y$  曲线模型, 给出了基于静力触探 (CPT) 试验的基坑开挖卸荷单桩水平承载力损失程度预测方法。研究指出, 采用卸荷后的真实土体 CPT 锥尖参数更能准确预测既有工程桩开挖卸荷水平承载力损失规律。

(2) 获得了基坑开挖卸荷前后的土体 CPT 锥尖参数变化规律, 并对侧向卸荷效应、竖向卸荷效应两类开挖效应进行了分析。CPT 测试的优势在于能够真实反映开挖卸荷后桩侧土体的应力改变, 进而对卸荷桩基作出准确预测。

(3) 通过综合考察卸荷场桩顶加载及桩顶加载联合土体位移共同作用两种形式, 明确了卸荷桩基水平承载变形响应规律。给出了卸荷桩设计建议, 卸荷桩

设计须同时考虑卸荷桩较自由场地桩基的水平承载力损失及土体运动位移对桩基水平承载力的影响。

## 参考文献:

- [1] KOK S T, HUAT B, NOORZAEI J, et al. A case study of passive piles failure in open excavation[J]. DFI Journal-The Journal of the Deep Foundations Institute, 2009, 3(2): 49 - 56.
- [2] 韩爱民, 肖军华, 梅国雄. 横向流动土体作用下的群桩反应性状[J]. 岩土工程学报, 2005, 27(12): 1463 - 1467. (HAN Ai-min, XIAO Jun-hua, MEI Guo-xiong. Behavior of pile groups subjected to excavation-induced lateral soil movement[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(12): 1463 - 1467. (in Chinese))
- [3] ROSCOE K H, SCHOFIELD A N, THURAIRAJAH A. Yielding of clays in states wetter than critical[J]. Géotechnique, 1963, 13(3): 211 - 240.
- [4] YIN Z Y, CHANG C S. Stress-dilatancy behavior for sand under loading and unloading conditions[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2013, 37(8): 855 - 870.
- [5] 刘国彬, 贾付波. 基坑回弹时间效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊 1): 3040 - 3044. (LIU Guo-bin, JIA Fu-bo. Test research on time effect of foundation pit rebound[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S1): 3040 - 3044. (in Chinese))
- [6] POULOS H G, CHEN L T. Pile response due to excavation-induced lateral soil movement[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 1997, 123(2): 94 - 99.
- [7] GOH A, WONG K S, TEH C I, et al. Pile response adjacent to braced excavation[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2003, 129(4): 383 - 386.
- [8] ONG D E, LEUNG C E, CHOW Y K. Pile behavior due to excavation-induced soil movement in clay: I stable wall[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(1): 36 - 44.
- [9] 黄茂松, 王卫东, 郑刚. 软土地下工程与深基坑研究进展[J]. 土木工程学报, 2012, 45(6): 146 - 161. (HUANG Mao-song, WANG Wei-dong, ZHENG Gang. A review of recent advances in the underground engineering and deep excavations in soft soils[J]. China Civil Engineering Journal, 2012, 45(6): 146 - 161. (in Chinese))
- [10] LEE J, KIM M, KYUNG D. Estimation of lateral load

- capacity of rigid short piles in sands using CPT results[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2009, **136**(1): 48 – 56.
- [11] DYSON G J, RANDOLPH M F. Monotonic lateral loading of piles in calcareous sand[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2001, **127**(4): 346 – 352.
- [12] HALDAR S, SIVAKUMAR BABU G L. Design of laterally loaded piles in clays based on cone penetration test data: a reliability-based approach[J]. Géotechnique, 2009, **59**(7): 593 – 607.
- [13] SURYASENTANA S K, LEHANE B M. Numerical derivation of CPT-based  $p$ - $y$  curves for piles in sand[J]. Géotechnique, 2014, **64**(3): 186 – 194.
- [14] 李洪江, 刘松玉, 童立元. 基于 CPTU 测试  $p$ - $y$  曲线法及其在桩基水平承载中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, **36**(2): 513 – 520. (LI Hong-jiang, LIU Song-yu, TONG Li-yuan. A  $p$ - $y$  curve method for determining the horizontal bearing capacity of single pile based on CPTU test and its
- application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, **36**(2): 513 – 520. (in Chinese))
- [15] STEWART D P. Program PYGMY version 2.31,  $p$ - $y$  analysis of laterally loaded piles under general loading-user manual[J]. University of Western Australia, 2000.
- [16] JGJ106—2014 建筑基桩检测技术规范[S]. 2014. (JGJ106—2014 Technical code for testing of building foundation piles[S]. 2014. (in Chinese))
- [17] JGJ 94—2008 建筑桩基技术规范[S]. 2008. (JGJ 94—2008 Technical code for building pile foundations[S]. 2008. (in Chinese))
- [18] 李洪江, 童立元, 刘松玉, 等. 后注浆超长灌注桩水平承载特性现场试验研究[J]. 建筑结构学报, 2016, **37**(6): 204 – 211. (LI Hong-jiang, TONG Li-yuan, LIU Song-yu, et al. Experimental study on lateral bearing behavior of post-grouting super-long bored pile[J]. Chinese Journal of Building Structures, 2016, **37**(6): 204 – 211. (in Chinese))

## 《岩土工程学报》征订启事

《岩土工程学报》创刊于 1979 年, 是我国水利、土木、力学、建筑、水电、振动等六个全国性学会联合主办的学术性科技期刊。由南京水利科学研究院承办, 国内外公开发行。主要刊登土力学、岩石力学领域中能代表当今先进理论和实践水平的科学的研究和工程实践成果等。报道新理论、新技术、新仪器、新材料的研究和应用。欢迎国家自然科学基金项目及其他重要项目的研究成果向本刊投稿, 倡导和鼓励有实践经验的作者撰稿, 并优先刊用这些稿件。主要栏目有黄文熙讲座、综述、论文、短文、工程实录、焦点论坛、讨论和简讯等。

本刊被《中文核心期刊要目总览》连续多年确认为核心期刊, 并在建筑类核心期刊中位于前列; 本刊被科技部“中国科技论文统计源期刊”(中国科技核心期刊)及“中国科技论文与引文数据库”收录; 本刊被中国科学院“中国科学引文数据库”收录; 本刊被“中国知网”全文收录及“中国学术期刊综合评价数据库”收录; 本刊被“工程索引 Ei Compendex”数据

库”和“日本科学技术振兴机构数据库 JST”等国际数据库收录。本刊网址 ([www.cgejournal.com](http://www.cgejournal.com)) 全文发布本刊所有刊载文章。

本刊读者对象为土木建筑、水利电力、交通运输、矿山冶金、工程地质等领域中从事岩土工程及相关专业的科研人员、设计人员、施工人员、监理人员和大专院校师生。

本刊为月刊, A4 开, 双栏排版, 192 页, 每月中旬出版, 每期定价 40 元, 全年定价 480 元。

本刊国际标准刊号 ISSN 1000 - 4548, 国内统一刊号 CN 32 - 1124/TU, 国内发行代号 28 - 62, 国外发行代号 MO 0520。欢迎广大读者在全国各地邮局订购, 也可在编辑部订购(不另收邮费)。编辑部订购地址: 南京虎踞关 34 号《岩土工程学报》编辑部; 邮编: 210024; 联系电话: 025-85829534, 85829543, 85829553, 85829556; 传真: 025-85829555; E-mail: ge@nhri.cn。

《岩土工程学报》编辑部